



УДК 621.879:681.518.5

ОБЗОР МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Герике П.Б.¹, Герике Б.Л.^{1,2,3}, Пудов Е.Ю.³

¹ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии

² Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева

³ Прокопьевский филиал Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева

Информация о статье

Принята 21 декабря 2020 г.

Ключевые слова:

Зубчатая передача, форма виброакустического сигнала, спектральный анализ, спектральный анализ, спектр огибающей, порядковый анализ, вейвлет-анализ

Аннотация.

В статье рассмотрены методы вибрационной диагностики повреждений зубчатых передач в редукторах горных машин. Проанализированы достоинства и недостатки различных методов анализа виброакустических сигналов, генерируемых дефектной зубчатой парой, показан наиболее приемлемый, с точки зрения трудоемкости получения информации, сложности обработки сигналов и достоверности получаемых результатов, метод опорных спектральных масок.

REVIEW OF GEAR TRANSMISSION DIAGNOSTICS METHODS

Pavel B. Gerike¹, Boris L. Gerike^{1,2,3}, Eugene Yu. Pudov³

¹ Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

³ Prokopyevsk branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

Article info

Received December 21, 2020

Keywords: Tooth gear, vibroacoustic waveform, spectral analysis, cepstral analysis, envelope spectrum, order analysis, wavelet analysis

Abstract.

The article deals with the methods of vibration diagnostics of gear damage in mining machinery gearboxes. The advantages and disadvantages of various methods of analysis of vibroacoustic signals generated by a defective gear pair are analyzed, the most acceptable, in terms of labor intensity of obtaining information, complexity of signal processing and reliability of the results obtained, method of reference spectral masks is shown.

Введение

Диагностирование зубчатых передач является достаточно сложным, трудоемким, обычно весьма длительным по времени процессом [1-3]. Диагностический математический аппарат, используемый для оценки состояния зубчатых пар, достаточно сложен и включает в себя практически весь арсенал методов анализа вибросигналов.

Рассмотрим более подробно эти методы.

Диагностика по форме сигнала

Временной сигнал вибрации на зубчатых парах обычно является по своей форме очень сложным, «зашумленным» большим количеством колебаний разной частоты и амплитуды (рисунки 1).

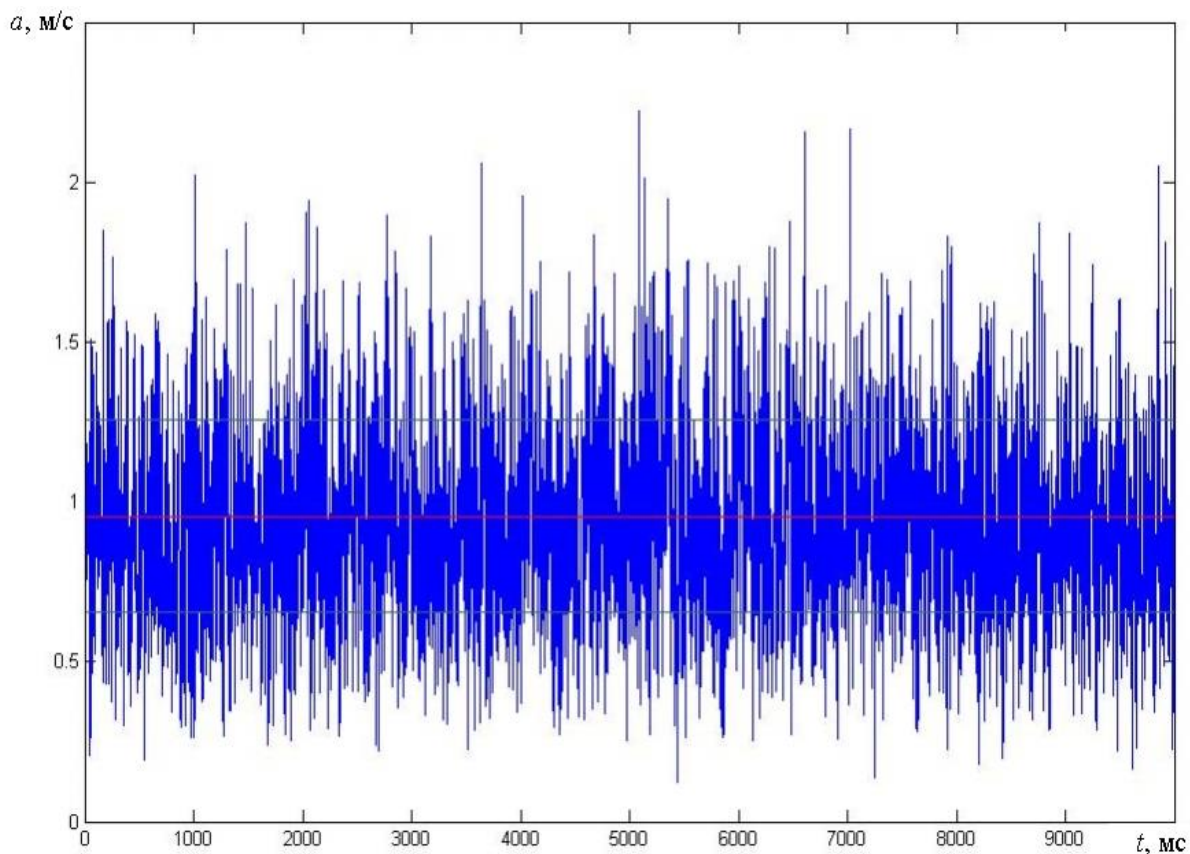


Рис. 1. Временной сигнал бездефектной зубчатой передачи

По форме временного вибросигнала можно, но достаточно сложно, выявлять такие «крупные» дефекты, как трещина в одном или нескольких зубьях, достаточно хорошо диагностируется отсутствие зуба. Все остальные, более «мелкие» дефекты состояния зубчатых пар, по временному сигналу вибрации диагностируются весьма сложно [4, 5].

Диагностика по спектру вибросигнала

Спектр вибросигнала является наиболее простым и распространенным диагностическим аппаратом, позволяющим определять все основные дефекты зубозацепления. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ, DFT) – популярный инструмент для спектрального анализа, который эффективен для обработки стационарных сигналов. С другой стороны, быстрое преобразование Фурье (БПФ, FFT) представляет собой более эффективный метод обработки [6-8].

Некоторые методы, такие как оконное преобразование Фурье (STFT), преобразование Вигнера-Вилла (WVD), непрерывное вейвлет-преобразование (CWT), также доступны для частотно-временного анализа сигнала на основе принципа двумерного отображения [9-14]. Однако, STFT не позволяет одновременно улучшить временное и частотное разрешение [10], WVD позволяет обрабатывать нестационарные сигналы, однако возможна неправильная интерпретация результатов из-за билинейной характеристики [15]. В свою очередь, CWT позволяет лучше анализировать одновременно и по времени, и по частоте, однако большое время вычислений и фиксированное разрешение по частоте могут препятствовать практическому применению [13].

В качестве примера рассмотрим сигнал, поступающий от вибродатчика, который установлен в зоне вращения зубчатых передач. На рисунке 2 представлен спектр мощности сигнала с равномерным шагом по частоте в частотном диапазоне до 100 Гц. Шаг по частоте и, следовательно, частотное разрешение спектрального анализа составляет 0,12 Гц.

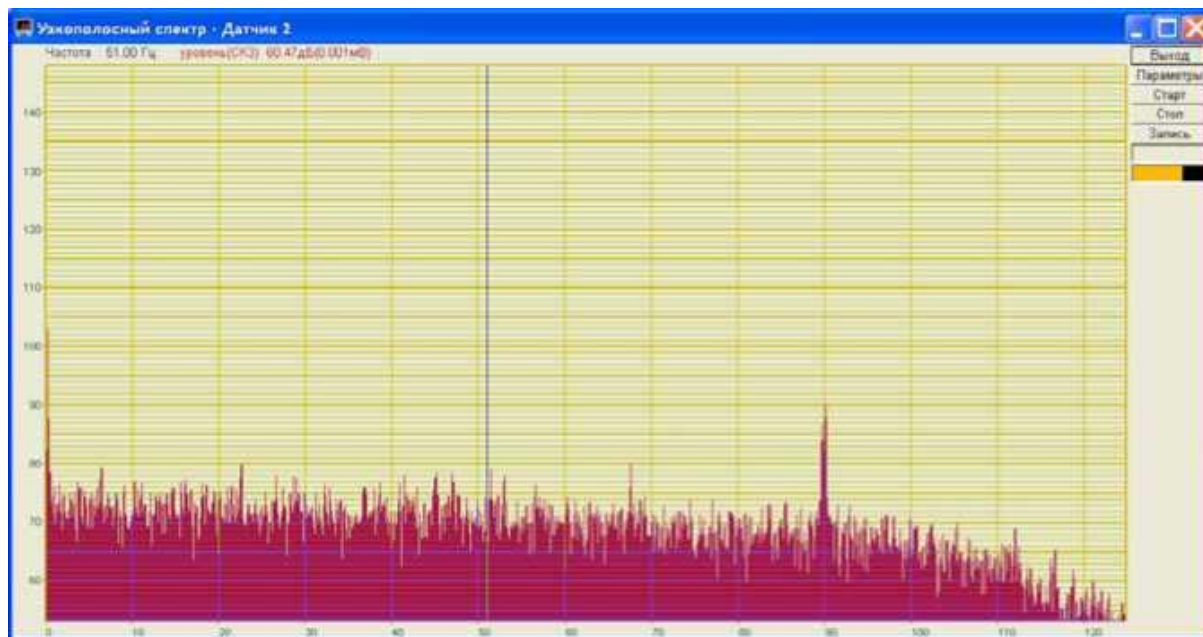


Рис. 2. Узкополосный спектр зубчатой передачи

На графике наблюдается пик на частоте около 90 Гц. Эта частота соответствует оборотам вала – 5400 об/мин. Наличие этого частотного пика в спектре сигнала вибродатчика говорит о биениях, происходящих на каждом обороте вала. Причин может быть несколько. Для выявления основного источника биения на частоте вращения вала необходимо установить датчики рядом с подшипниками вала и сравнить полученные спектры. Также необходимо сравнивать спектры сигналов с контрольных датчиков стоящих на опорах сервисных механизмов, чтобы убедиться в том сигнал на 90 Гц не является наведенным от других механизмов. На рисунке 3 представлен спектр сигнала с равномерным шагом по частоте в частотном диапазоне до 1000 Гц.

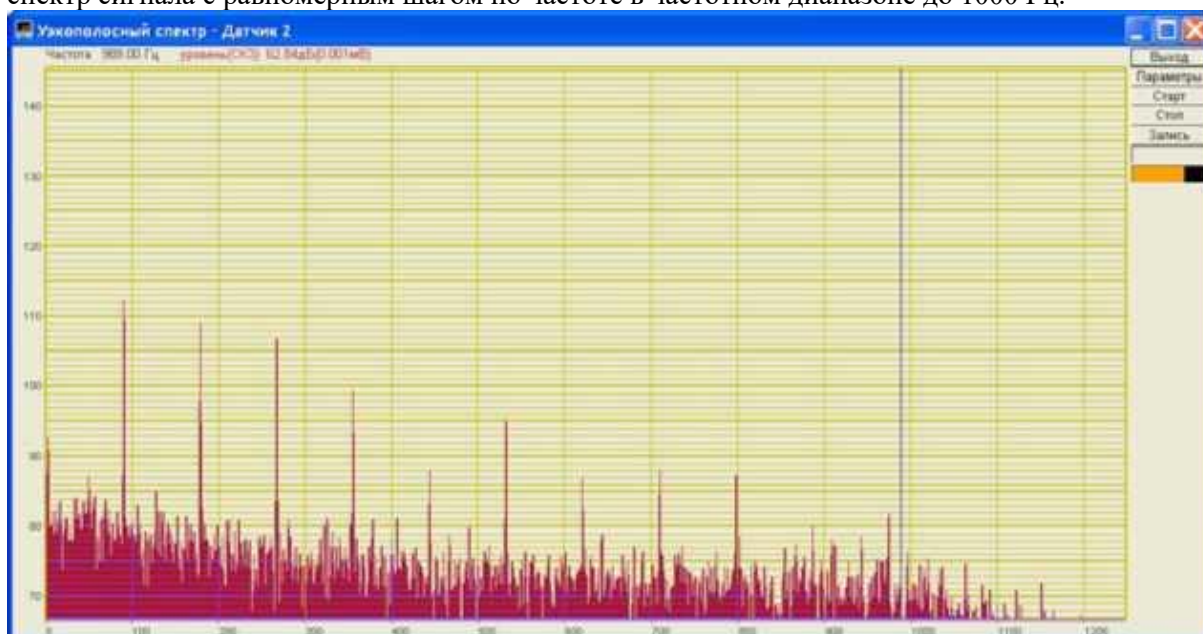


Рис. 3. Узкополосный спектр зубчатой передачи в частотном диапазоне $f_p = 2-1000$ Гц

Частотное разрешение спектрального анализа составляет 1,2 Гц. На этом рисунке видны пики на частотах 90, 180, 270 и так далее на кратных 90 Гц частотах. Отчетливо наблюдаются частотные пики до 9-ой гармоники 90 Гц. Наличие гармоник основной частоты показывает, что

колебания или биения происходят не по гармоническому закону. Наличие четных гармоник 2, 4 и т.д. говорит о несимметричных колебаниях.

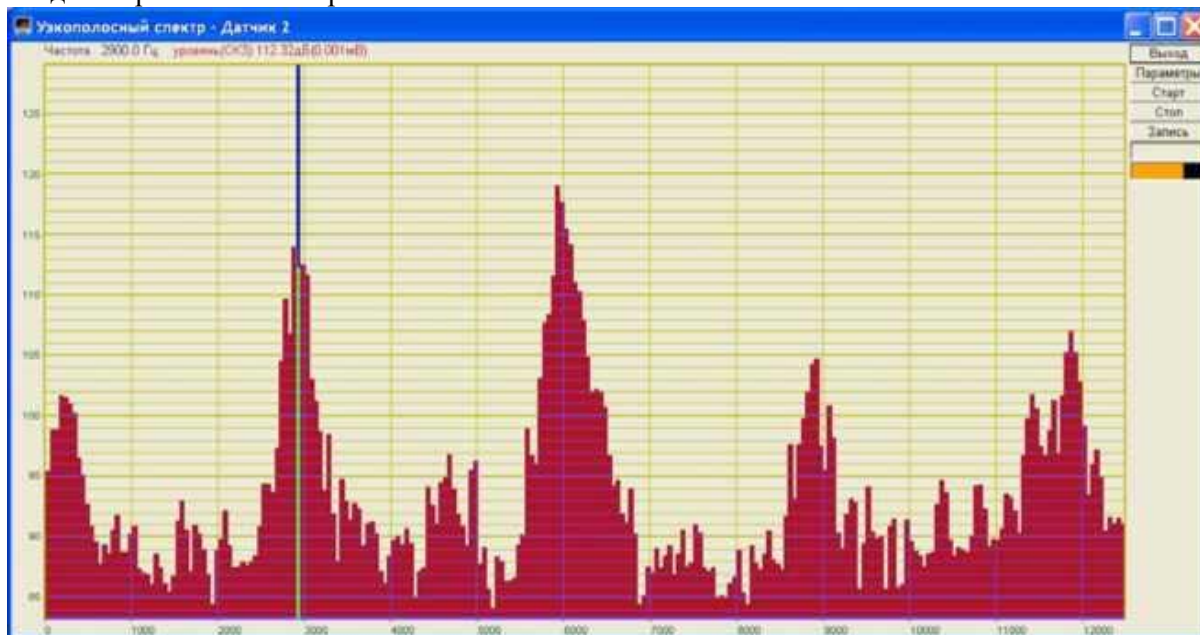


Рис. 4. Узкополосный спектр зубчатой передачи в частотном диапазоне $f_p = 0,1-10$ кГц

На рисунке 4 представлен спектр сигнала с равномерным шагом по частоте в частотном диапазоне до 10 кГц. Частотное разрешение спектрального анализа составляет 48 Гц. На этом рисунке уже не видны пики частоты вращения вала и ее гармоник. Но в этом частотном диапазоне спектрального анализа проявляется зубцовая частота в окрестности 3 кГц и гармоники на частотах 6 и 9 кГц. Для оценки частоты вращения вала можно использовать сигнал от датчика оборотов и его спектр.

На рисунке 5 представлен спектр сигнала датчика оборотов с равномерным шагом по частоте в частотном диапазоне до 100 Гц. Шаг по частоте и частотное разрешение спектрального анализа составляет 0,12 Гц. Частотные пики на рисунке 1 и 4 совпадают, и это подтверждает, что вибрация связана с вращением вала.

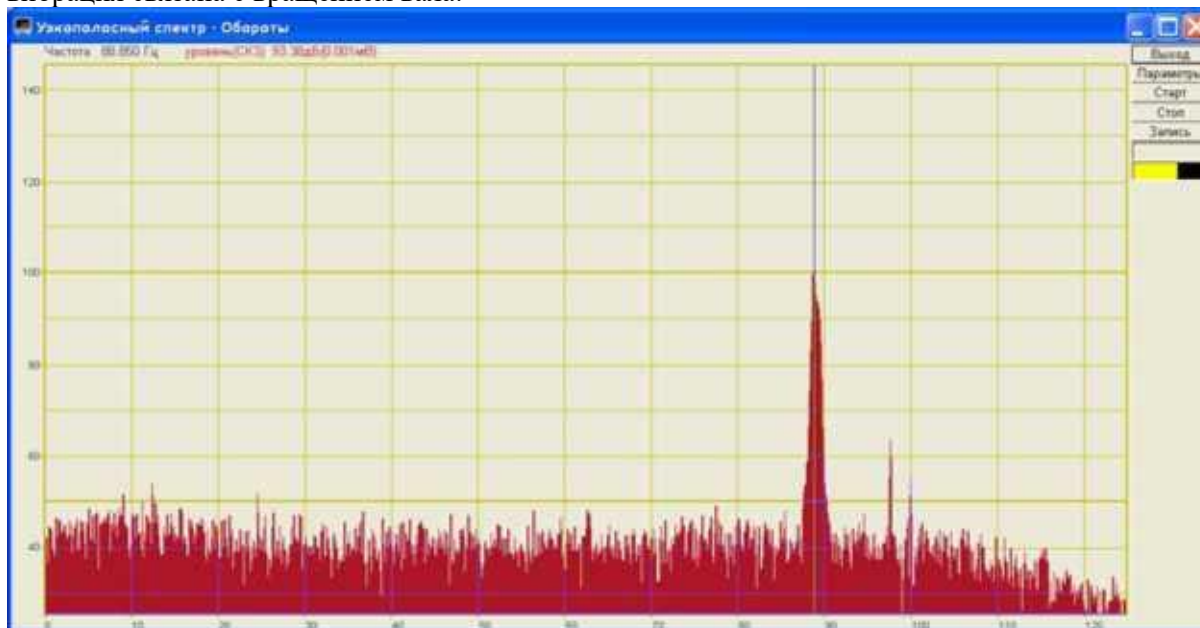


Рис. 5. Узкополосный спектр датчика числа оборотов



Во многих случаях удобно представлять спектр с логарифмическим шагом по частоте. На рисунке 6 представлен спектр мощности сигнала вибродатчика, шаг по частоте составляет 1/24 часть октавы, ширина и шаг по частоте составляют 3% от значения частоты. Такой вид представления спектра сигнала позволяет наблюдать одновременно малые и большие частоты. На левой стороне рисунка видны частотные пики на частоте вращения вала f_p и ее гармоник 90, 180 ..., на правой стороне рисунка видны частотные пики зубцовой частоты f_z и ее гармоник 3, 6 и 9 кГц.

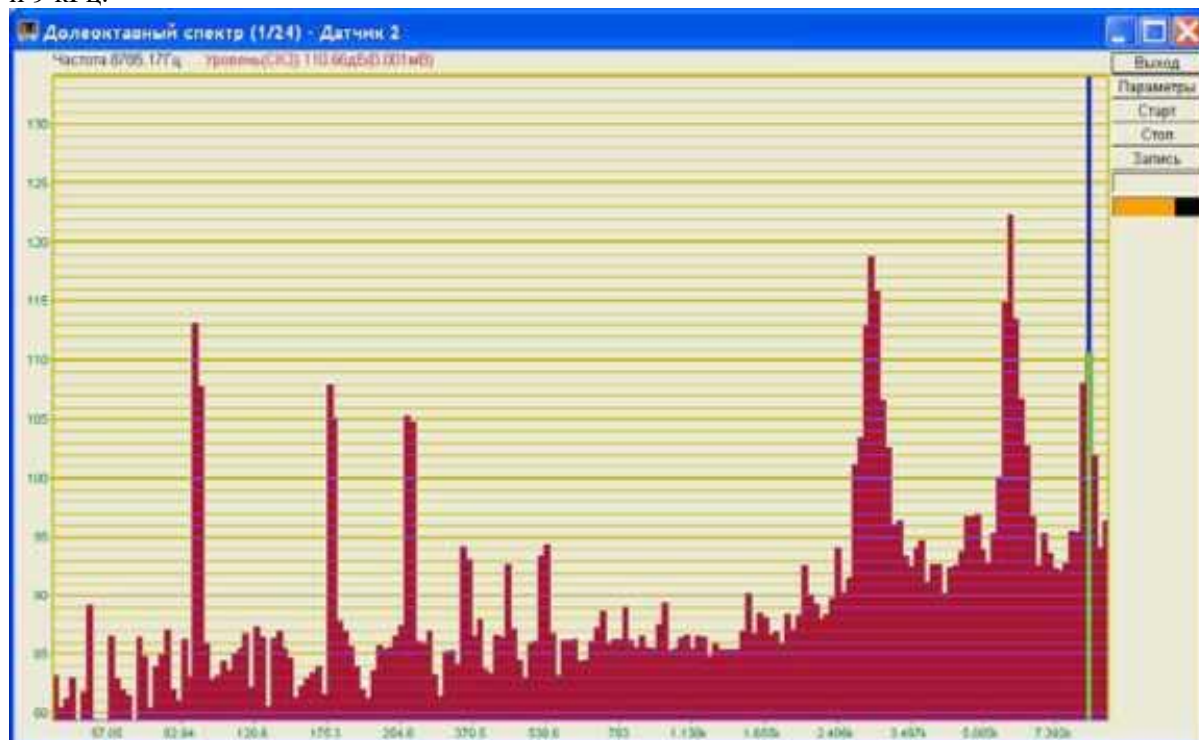


Рис. 6. 1/24-октавный спектр зубчатой передачи в частотном диапазоне $f_p = 0,1-10$ кГц

Контроль и отбраковка зубчатых передач может проводиться по уровням спектральных компонент основных и кратных гармоник оборотных f_p и зубцовых частот f_z . Для этого требуется построение спектральных масок для каждого конкретного типа редуктора, нормирующих вибрацию в конкретных частотных диапазонах.

Диагностика на основе кепстрального анализа виброакустических сигналов

Агрегаты с вращающимся ротором в большинстве случаев имеют полигармонический спектр возбуждения колебаний. Например, при некоторых дефектах зубчатого зацепления или подшипников качения иногда характерно присутствие десятков гармоник основных частот возбуждения. При решении задач вибродиагностики роторных агрегатов с широким спектром возбуждения колебаний информативной характеристикой может оказаться кепстр (анаграмма слова спектр).

Существуют различные способы определения кепстра: квадрат косинусоидальной или синусоидальной составляющих Фурье-преобразования логарифмического спектра либо сумма квадратов косинусоидальной и синусоидальной составляющих Фурье-преобразования. Наибольшей помехоустойчивостью обладает кепстр, определяемый как косинусоидальная составляющая преобразования Фурье логарифмического спектра (псевдокорреляция).

В качестве диагностических признаков используются амплитуды кепстральных составляющих, иначе рахмоник (анаграмма термина гармоника), для временного отсчета – сачтота (анаграмма термина частота), соответствующая периоду частоты возбуждения.

Кепстральный анализ используется для идентификации серий гармоник и (или) боковых частот спектров для оценки их относительной мощности. Не вдаваясь в подробности

математического преобразования, можно сказать, что кепстр мощности является как бы результатом частотного анализа результатов частотного анализа.

Серия импульсов во временной области (временном сигнале) отображается в частотной области (спектре) в виде дискретной составляющей (линии спектра) на частоте повторения импульсов и ее гармониках в соответствии с формой исходных импульсов. Подобно этому серия «периодических» дискретных составляющих частотного спектра отображается в кепстре в виде дискретной линии (серии дискретных линий). Вдоль оси абсцисс кепстра откладывают единицы времени в секундах или Гц^{-1} , а положение первой линии соответствует обратной величине просвета боковых полос или гармоник преобразуемого спектра (рисунок 7).

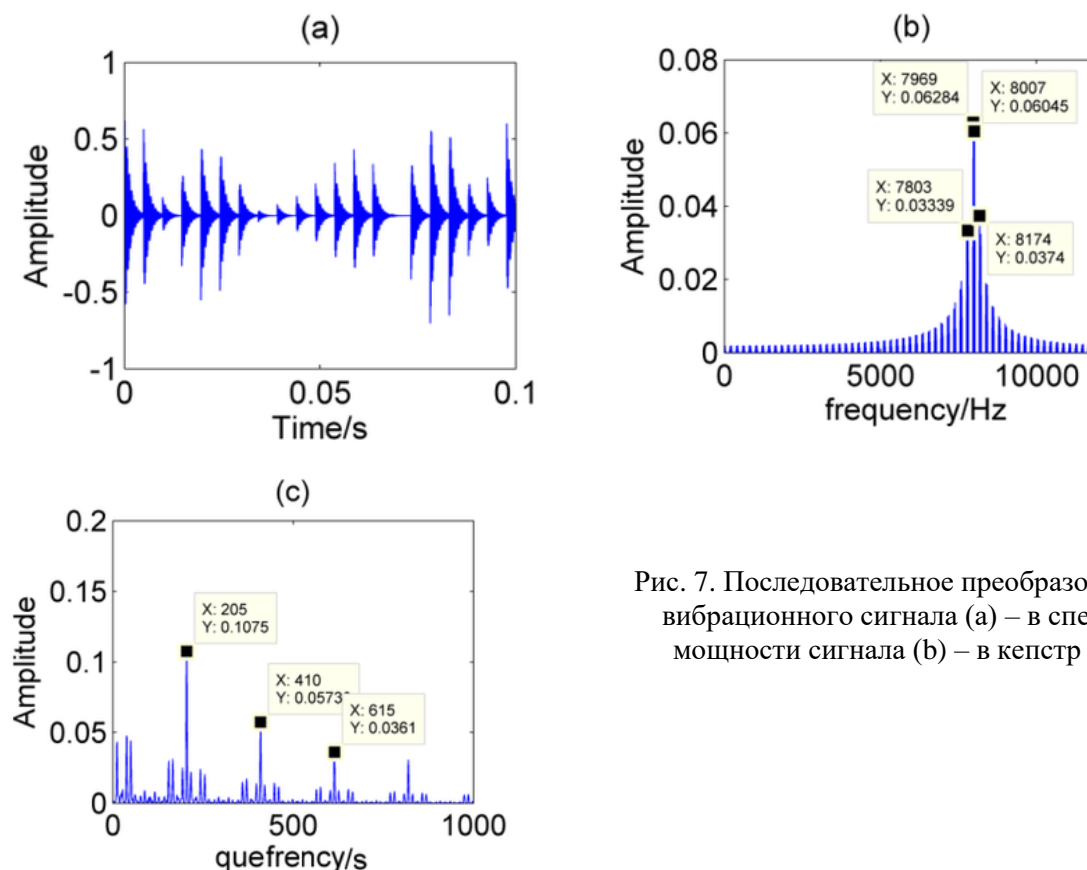


Рис. 7. Последовательное преобразование
вибрационного сигнала (а) – в спектр
мощности сигнала (b) – в кепстр (с)

Кепстральный анализ в значительной степени нечувствителен к изменениям фазы исследуемых сигналов и к особенностям путей распространения механических колебаний. Например, кепстры механических колебаний одинаковых зубчатых передач, находящихся в различных агрегатах с одинаковой частотой вращения ротора, практически идентичны по частотному составу.

Кепстр вибросигнала применим на первых фазах проводимой диагностики, позволяет дифференцировать наиболее дефектные зубчатые пары в сложных редукторах, сравнивать их между собой по уровню износа, и по вероятности наличия дефекта

Очень важно понимать те принципиальные различия, которые есть между частотными составляющими в традиционном спектре и частотными составляющими в спектре, называемом кепстром. В первом случае любая частотная составляющая имеет физический смысл, сигнал с такой частотой и амплитудой действительно присутствует в исходном сигнале во временной области. Во втором же случае, в кепстре, присутствие гармоник может совсем не означать, что в исходном спектре существуют соответствующие периодичности, а только то, в какой мере вид



дискретных составляющих в исходном спектре более или менее островершинный. Поэтому при кепстральном анализе нужен большой опыт и очень хорошая подготовка, чтобы правильно интерпретировать результаты и делать правильные выводы.

Диагностика по спектру огибающей

В случае возникновения и развития дефекта на вращающемся элементе в виброакустическом сигнале должна наблюдаться амплитудная модуляция, вызываемая частотой вращения вала f_p . Степень модуляции зависит от уровня развития дефекта. Для поиска и анализа такого рода неисправностей служит специальная программа – выделение огибающей, в которой настраивается цифровой фильтр – центральная частота (принимается, как правило, частоте возникновения дефекта – обычно f_z) и ширина полосы фильтра (обычно частота вращения вала f_p), после чего с заданными параметрами обрабатывает входной поток оцифрованных данных. Выходной сигнал после обработки можно посмотреть в виде графика. На рисунке 8 показаны графики сигналов: исходный сигнал, сигнал после фильтра и огибающая сигнала акселерометра.

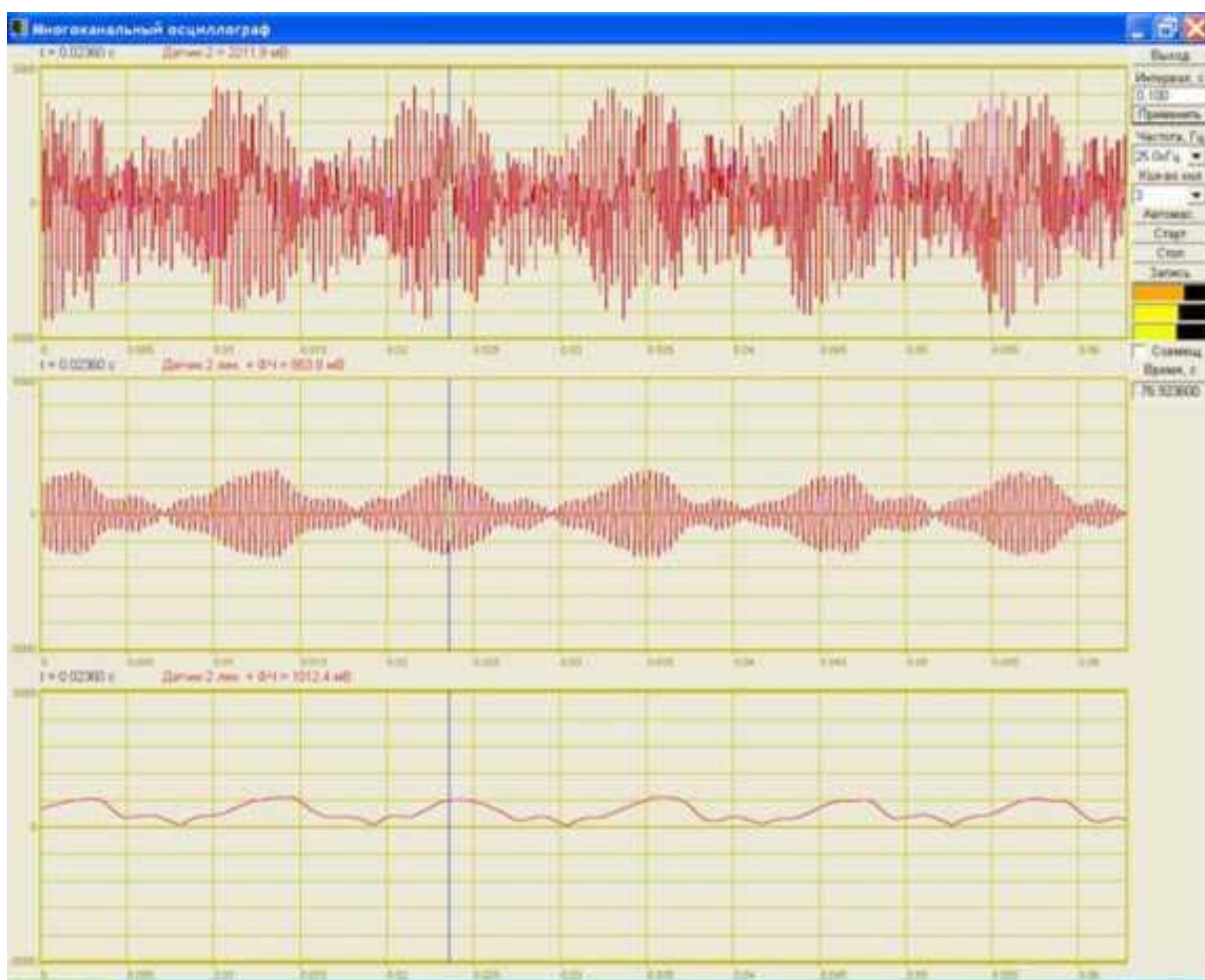


Рис. 8. Исходный сигнал (вверху), сигнал после фильтрации (в середине), огибающая сигнала (внизу)

Для выделения периодической составляющей из амплитудной огибающей сигнала используется преобразование Фурье. На рисунке 9 показан график спектра амплитудной огибающей.

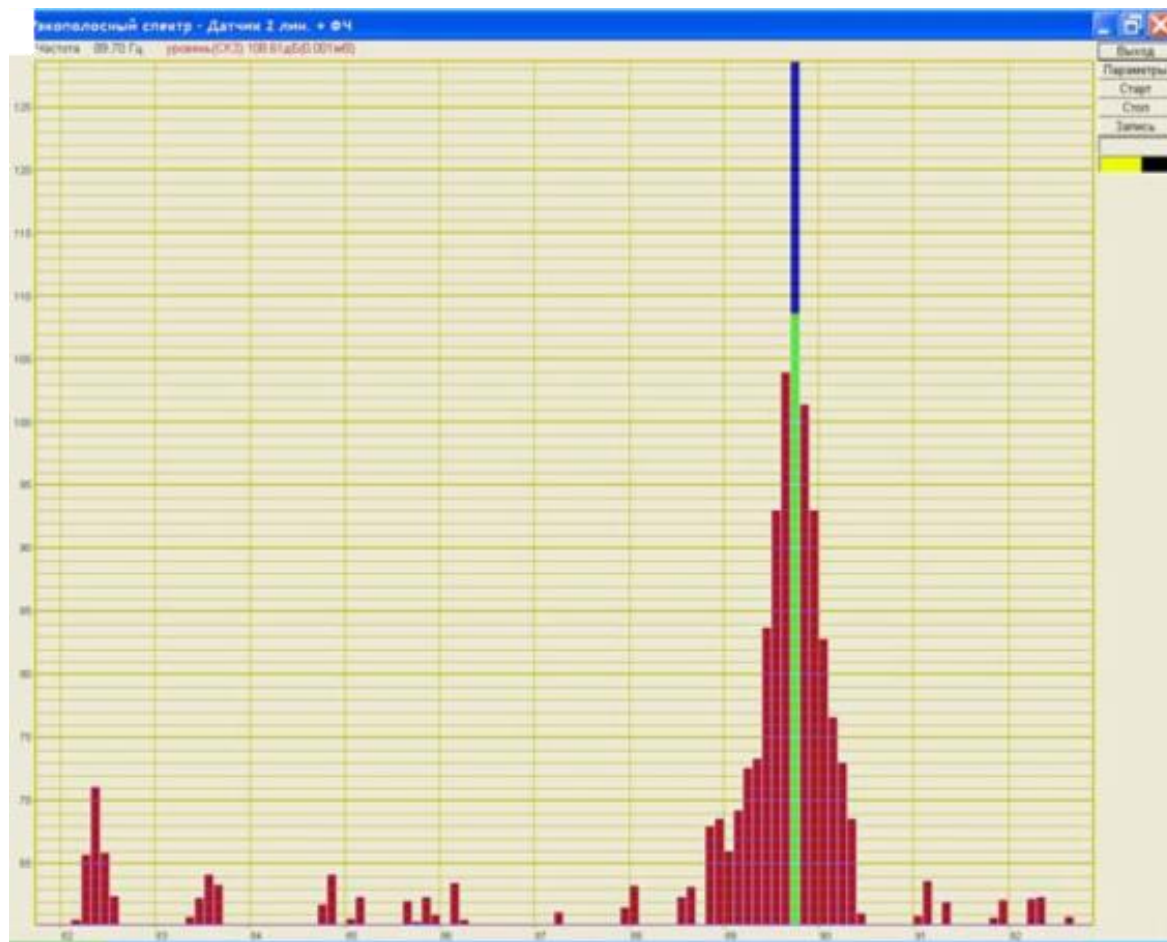


Рис. 9. Спектр огибающей

На графике виден пик на частоте около 90 Гц, равной частоте вращения вала. Большой уровень этого пика свидетельствует о большой степени модуляции сигнала акселерометра на зубцовой частоте, что, как следствие, может вызываться осевой несимметричностью зубчатой пары.

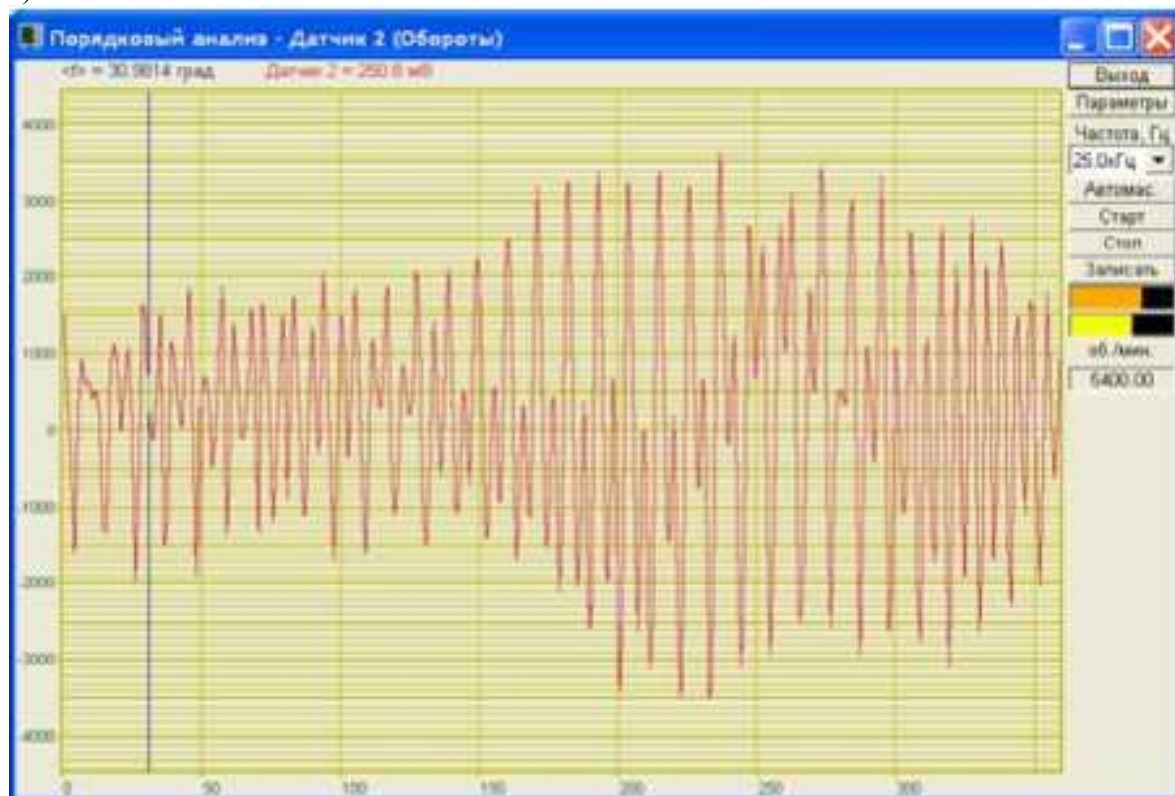
Диагностика по спектру огибающей сигнала достаточно сложна для физического толкования дефектов зубозацепления, поскольку выбор центральной частоты и ширины фильтра требует хорошей теоретической подготовки и знания кинематики анализируемого зубчатого зацепления.

Диагностика на основе порядкового анализа

При наличии датчика оборотов и вибродатчиков можно исследовать временные характеристики сигналов вибрации зубчатых передач. Как уже говорилось выше, сигнал вибродатчика зашумлен сигналами от других источников. Для того чтобы отстроиться от мешающих сигналов реализуется метод синхронного накопления сигналов. На каждом обороте вала датчик оборотов дает метку оборота. Этот сигнал является запускающим стробом для развертки сигнала вибродатчика. Получаемые развертки сигналов суммируются. При этом все источники сигналов связанных с частотой оборотов накапливаются и увеличиваются в сумматоре линейно пропорционально количеству оборотов N . Все остальные сигналы, некоррелированные с частотой f_p , накапливаются пропорционально \sqrt{N} , и при большом количестве усреднений полезный сигнал превышает уровень помехи. На рисунке 10а показан результат синхронного накопления сигнала вибродатчика в частотном диапазоне до 10 кГц. Частота оборотов около 90 Гц. На рисунке отчетливо видны сигналы от пересопрежения зубьев ($z = 35$).



а)



б)



Рис. 10. Результаты синхронного накопления виброакустического сигнала в частотном диапазоне до 10 кГц (а) и до 1 кГц (б)

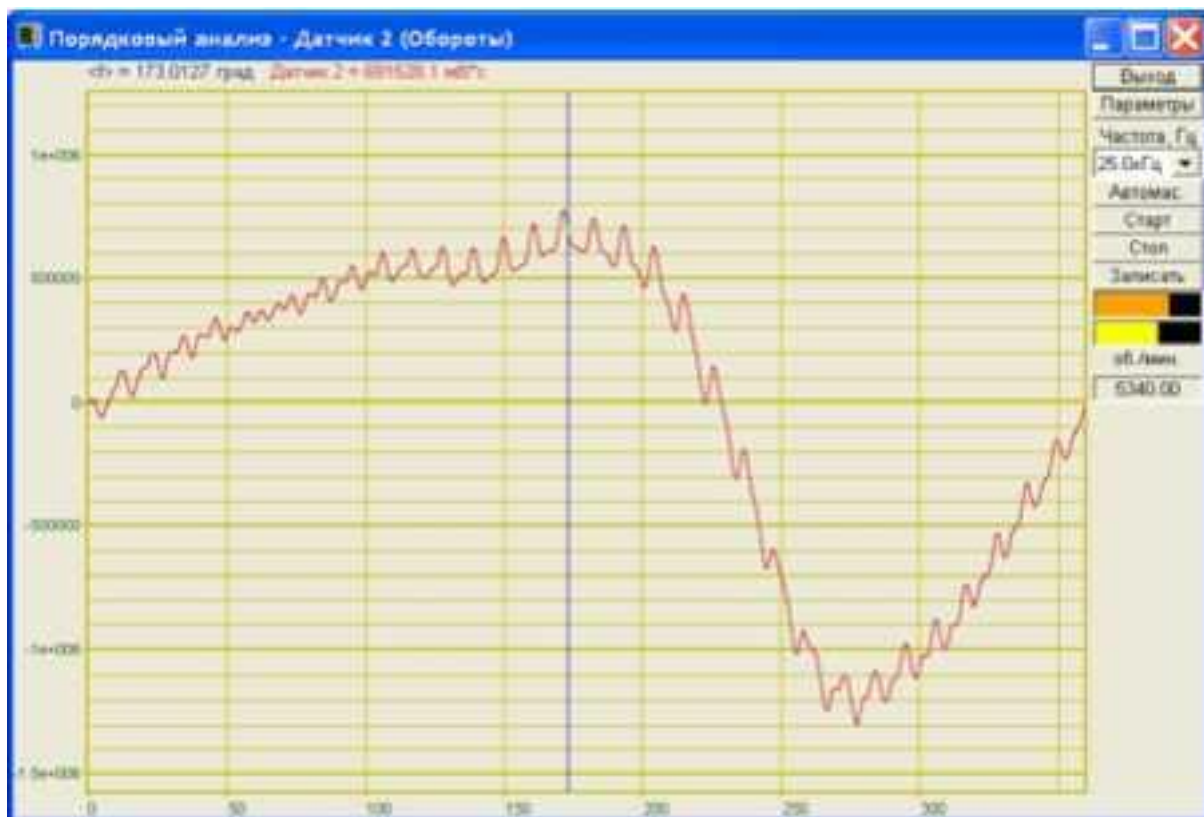


Рис. 11. Виброскорость в месте установки акселерометра

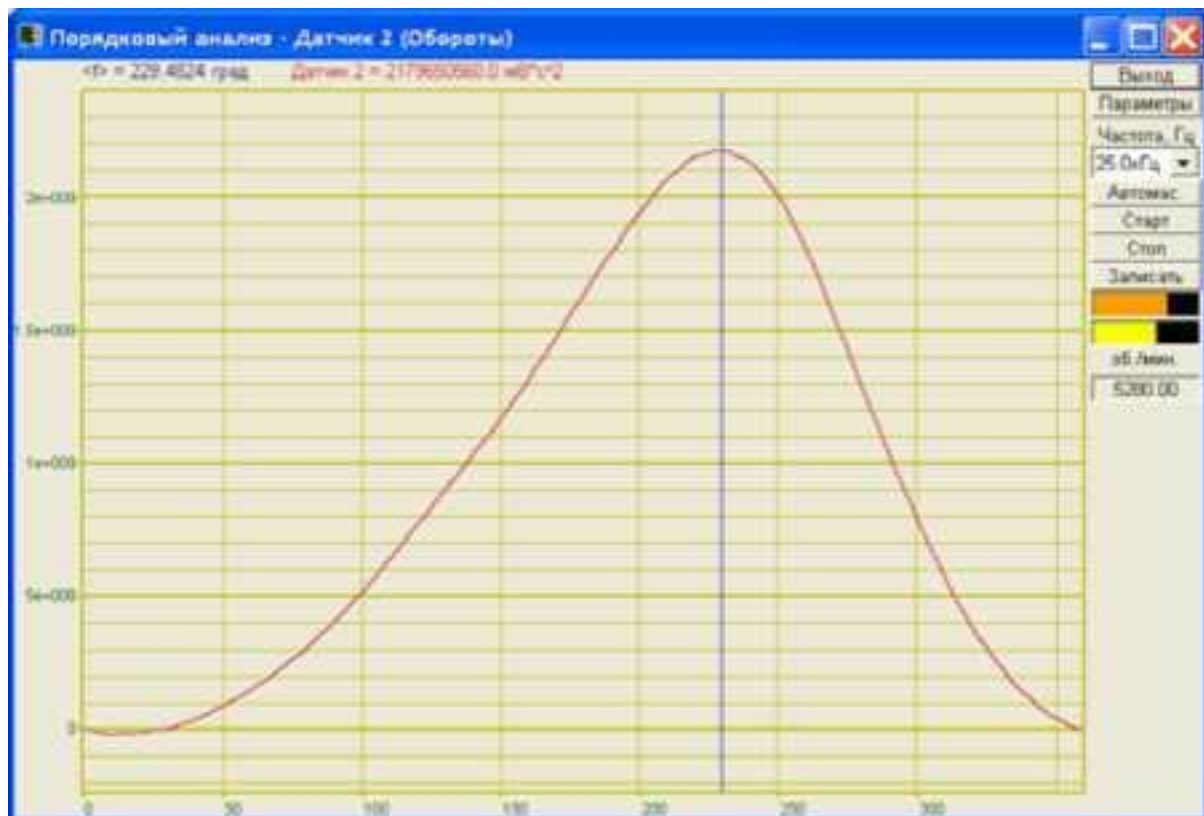


Рис. 12. Вибросмещение в месте установки акселерометра

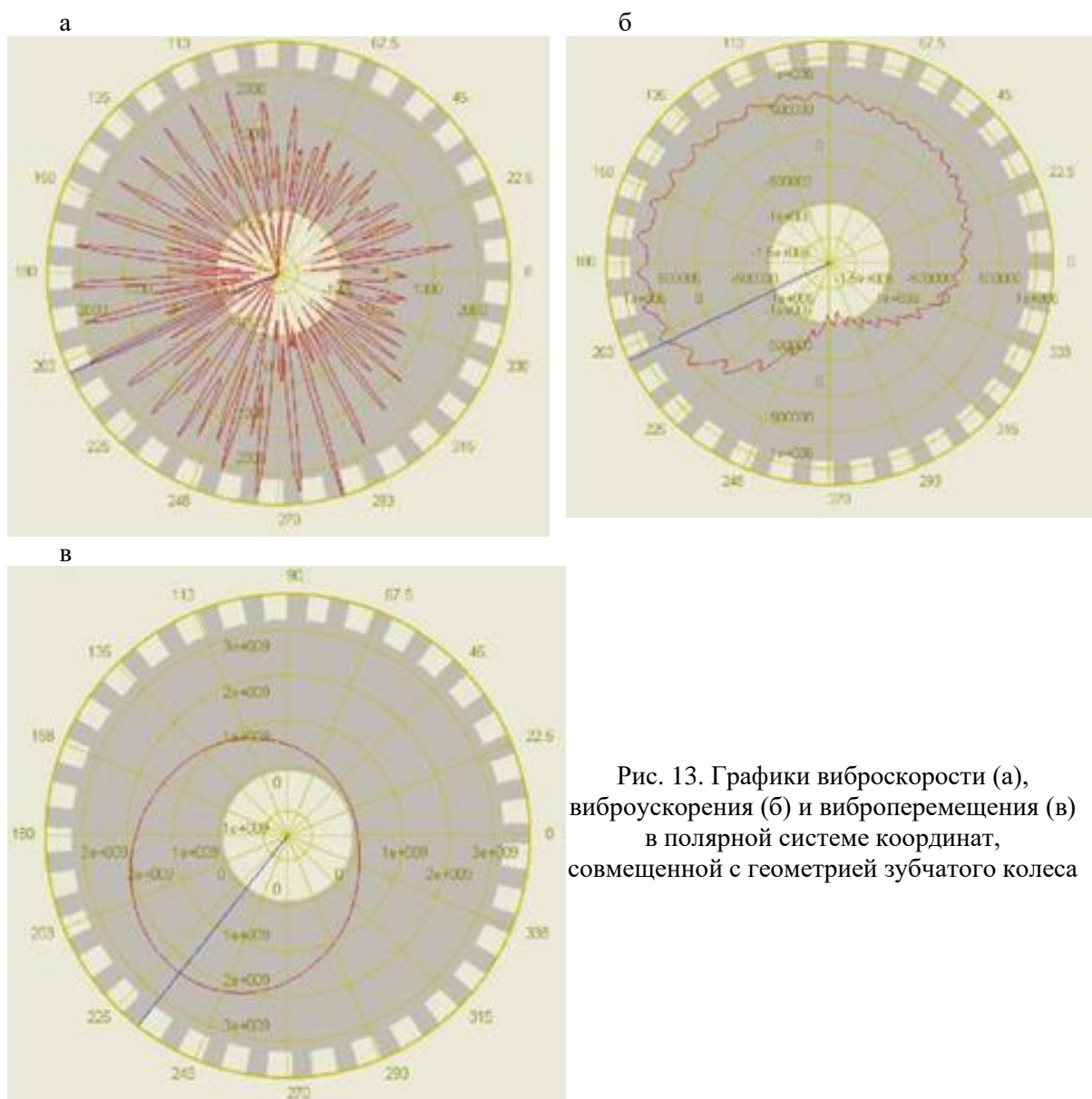


Рис. 13. Графики виброскорости (а), виброускорения (б) и виброперемещения (в) в полярной системе координат, совмещенной с геометрией зубчатого колеса

На рисунке 10б показан результат синхронного накопления сигнала вибродатчика в частотном диапазоне до 1 кГц. В этом частотном диапазоне отсутствуют высокочастотные зубцовые частоты. И поэтому на рисунке не видны сигналы от зубцов. Но присутствуют сигналы частоты f_p и их гармоники. На графике показан сигнал виброускорения вала. На рисунках 11 и 12 показаны виброскорость и виброперемещение в месте установки датчика ускорения.

На рисунке 13 отображены графики виброускорения, виброскорости и виброперемещения в полярных координатах с наложением на график рисунка зубчатого колеса. В таком представлении сразу видно, при какой фазе угла поворота происходят удары при зацеплении или расцеплении зубчатой пары.

Диагностика на основе вейвлет-анализа вибрационных процессов

Вейвлет-преобразование – это представление сигнала в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций, сконструированных на основе исходного вейвлета $\Psi(t)$, обладающего определенными свойствами, за счет операций сдвига во времени (b) и изменения временного масштаба (a) [16].

Главное отличие вейвлет-преобразования от преобразования Фурье, анализирующая функция которого покрывает всю временную ось, в том, что двухпараметрическая анализирующая функция одномерного вейвлет-преобразования хорошо локализована и во времени, и по частоте [11, 17].

$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right),$$

где Ψ – основная или материнская вейвлет-функция; Ψ_{ab} – анализирующая вейвлет-функция; b – сдвиг; a – масштаб или шкала, t – время.

Вейвлеты можно рассматривать как структурно устойчивые уединённые волны, распространяющиеся в нелинейной среде, которые ведут себя подобно частицам: при взаимодействии друг с другом или с некоторыми другими возмущениями они не разрушаются, а продолжают движение, сохраняя свою структуру неизменной [18].

Согласно исследованиям Michael Feldman [19], вейвлет-анализ эффективно использовать при диагностике насосных агрегатов и компрессоров.

На рисунке 14 в качестве примера приведены вейвлет типа «мексиканская шляпа» (а) и модуль его спектральной плотности (б).

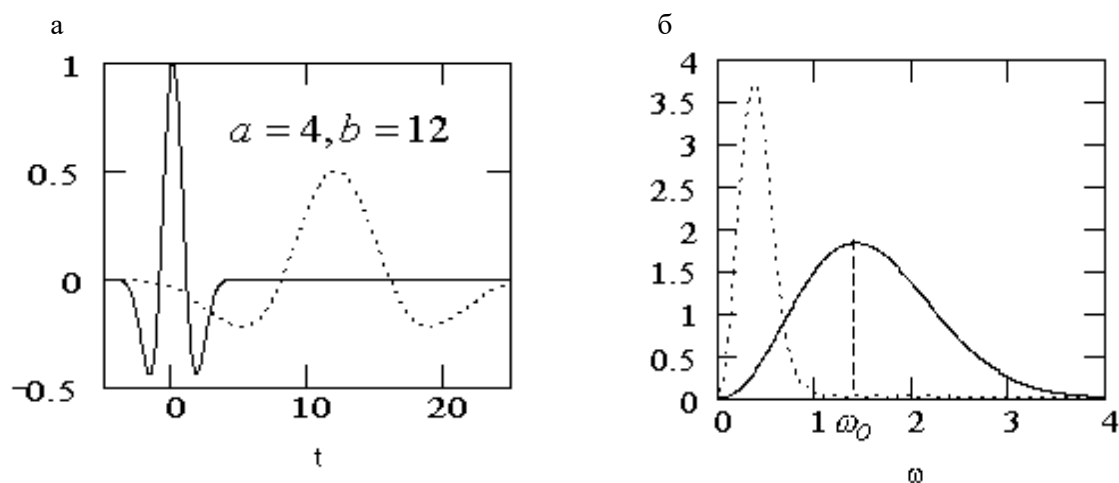


Рис. 14. Вейвлет типа «мексиканская шляпа» (а) и его спектральная плотность (б)

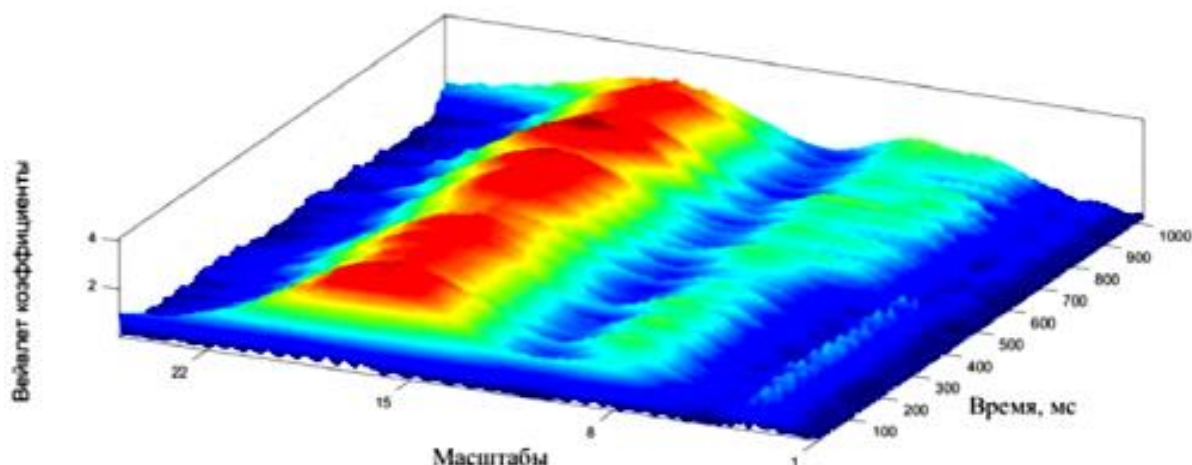


Рис. 15. Трёхмерное представление вейвлет-функции

Теория вейвлетов дает удобный и эффективный инструмент для решения многих практических задач. В отличие от преобразований Фурье, вейвлет-преобразование одномерных



сигналов обеспечивает двумерное разворачивание, при этом частота и координата рассматриваются как независимые переменные, что дает возможность анализировать сигнал сразу в двух пространствах [19, 20]. Анализируя вейвлет на рисунке 15, можно определить, что различные частотные компоненты вибрации присутствуют в определенные промежутки времени (циклы работы). Следует отметить, что в момент времени $t = 500$ мс в сигнале происходит изменение частотных компонент.

Метод вейвлет-анализа способен повысить возможности виброакустической диагностики за счет высокой информативности метода. К недостаткам метода можно отнести существенную трудоемкость и сложность в интерпретации результатов анализа; отсутствие однозначно определяющих дефект критериев оценки.

Сравнительный анализ различных методов диагностики

Анализ основных методов вибрационной диагностики, существующих ограничений по их применению, достоинств и недостатков показал, что на сегодняшний день не существует какого-то одного метода, который мог бы одинаково успешно использоваться в рамках экспресс-диагностики и при периодическом мониторинге независимо от вида диагностируемого оборудования и условий его эксплуатации.

Так, замер эксцесса, крайне информативный при экспресс-диагностике подшипников качения, реализован далеко не во всех приборах, подвержен помехам и уступает спектральным методам при периодическом мониторинге. В свою очередь спектральные методы «подвержены» ошибкам II рода (принятие заведомо ложной гипотезы).

Кроме того, многие методы имеют ограничения на область применения. Существенно затрудняют диагностику низкая частота вращения, ударные нагрузки, источники случайной высокочастотной вибрации. Таким образом, каждый из рассмотренных ранее методов имеет существенные ограничения и может быть использован лишь в небольшом количестве случаев (на определенной стадии развития дефекта или на конкретном оборудовании).

Другая проблема, возникающая при диагностике, — необходимость использования дополнительных априорных данных (частота вращения, конструктивные характеристики и т.д.). Если частота вращения может быть примерно определена, то, например геометрические размеры подшипника, как правило, неизвестны. Поэтому при построении диагностических критериев использование априорной информации должно быть сведено к минимуму.

Любые параметры вибрации или типы замеров, полученные на работающем агрегате, содержат диагностическую информацию, характеризующую состояние одновременно нескольких узлов машины. Поэтому при решении задачи оценки состояния отдельных узлов по параметрам вибрации необходимо исключать из рассмотрения составляющие иной природы. На сегодняшний день алгоритмы подобной фильтрации отсутствуют, поэтому при анализе виброакустических сигналов необходимо оценивать возможное влияние на характер и величину механических колебаний сил различной природы от различных источников (вала, рабочего колеса, муфты и т.д.).

Подводя итоги сказанному, можно утверждать, что для диагностики сложных систем, к которым относятся зубчатые передачи, наилучшим критерием их технического состояния является спектр вибрации, измеренный при мониторинге. При этом следует помнить, что при спектральном анализе вибрационных процессов должна быть использована информация о кинематике работы исследуемого редуктора, без которой вероятность постановки неверного диагноза (ошибки I и II рода) резко возрастает.

Кроме этого, с учетом требований современного производства для различных форм организации технического обслуживания и ремонта на предприятии в рамках создаваемой системы необходимо выполнять прогнозирование, оценивать остаточный ресурс и планировать оптимальным образом ремонтные мероприятия. Для этого при диагностике должны быть решены задачи выделения тренда из зашумленных данных и построения различного рода прогнозов.



Список источников

1. Диагностика горных машин и оборудования [Текст]./ Б.Л. Герике, П.Б. Герике, Г.И. Козовой [и др.] – М.: ИПО «У Никитских ворот», 2012. – 400 с.
2. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга [Текст]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. – 459 с.
3. Kelly, S. Graham. Advanced vibration analysis [Text]. 2013. – 637 p. – (Dekker mechanical engineering).
4. Краковский, Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования [Текст]. – Новосибирск: Наука, 2005. – 200 с.
5. Балицкий, Ф. Я. Диагностика дефектов машинного оборудования в нелинейной вибродиагностике методом каскадной демодуляции вибрации [Текст]./ Ф.Я. Балицкий, А.Г. Соколова, Г.В. Долаберидзе, Иванова М.А. // Вестник научно-технического развития. 2013. Т. 12, № 76. С. 3-12.
6. Zhou, Jing. Fault detection of rolling bearing based on FFT and classification [Text] / Jing Zhou, Yong Qin, Linlin Kou // Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. – 2015. – Vol. 9, no. 5. – P. JAMDSM0056.
7. Shahapurkar, Saurabh S. Detection of Fault in Gearbox System Using Vibration Analysis Method [Text] / Saurabh S. Shahapurkar, Hemant S. Pansare, Prashant P. Dhebe // International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS). 2015. May. Vol. 2, no. 5. P. 119-122.
8. Lin, Hsiung-Cheng. Bearing vibration detection and analysis using enhanced fast Fourier transform algorithm [Text] / Hsiung-Cheng Lin, Yu-Chen Ye, Bo-Jyun Huang // Advances in Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 8, no. 10. – P. 1687814016675080.
9. Асламов, Ю.П. Вейвлет-функция для диагностики подшипников качения [Текст] /Ю.П. Асламов, И.Г. Давыдов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. 2018. № 11. – С. 15-23.
10. Satish, L. Short-time Fourier and wavelet transforms for fault detection in power transformers during impulse tests [Text] / L. Satish // IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology. – 1998. – March. – Vol. 145, no. 2. – P. 77-84.
11. Герике Б.Л., Клишин В.И., Мокрушев А.А. Об одной оценке технического состояния опорных узлов горных машин [Текст].//ФТПРПИ, № 6. – 2019. – С. 106-114.
12. Kompella, K.C. Deekshit. DWT based bearing fault detection in induction motor using noise cancellation [Text] / K.C. Deekshit Kompella, Venu Gopala Rao Mannam, Srinivasa Rao Rayapudi // Journal of Electrical Systems and Information Technology. – 2016. – Vol. 3, no. 3. – P. 411 - 427.
13. Qin, Zengguang. Continuous wavelet transform for non-stationary vibration detection with phase-OTDR [Text] / Zengguang Qin, Liang Chen, Xiaoyi Bao // Opt. Express. – 2012. – Aug. – Vol. 20, no. 18. – P. 20459-20465.
14. Singru, Pravin. Bearing failure prediction using Wigner-Ville distribution, modified Poincare mapping and fast Fourier transform [Text] / Pravin Singru, Vishnuvardhan Krishnakumar, Dwarkesh Natarajan // Journal of Vibroengineering. – 2018. – July. – Vol. 20, no. 1. – P. 127-137.
15. Staszewski, W.J. Time-frequency analysis in gearbox fault detection using the Wigner-Ville distribution and pattern recognition [Text] / W.J. Staszewski, K. Worden, G.R. Tomlinson // Mechanical Systems and Signal Processing. — 1997.
16. Fedala, Semchedine. Contribution of Angular Measurements in the Diagnosis of Gear Faults by Artificial Neural Networks [Text]// Semchedine Fedala, Didier Remond, Rabah Zegadi// Surveillance 7 International Conference. – Chartres, France: Surveillance, 2013. – Oct. – P. 1-18.
17. Fedala, Semchedine. Contribution of angular measurements to intelligent gear faults diagnosis [Text] / Semchedine Fedala, Didier Remond, Rabah Zegadi // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2018. – Jun. – Vol. 29, no. 5. – P. 1115-1131.
18. Fei, Sheng-wei. Kurtosis prediction of bearing vibration signal based on wavelet packet transform and Cauchy kernel relevance vector regression algorithm [Text] / Sheng-wei Fei // Advances in Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 8, no. – P. 1-7.
19. Feldman, Michael. Hilbert transform in vibration analysis [Text] / Michael Feldman // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2011. – Vol. 25, no. 3. – P. 735-802.
20. Feng, G. An investigation of the orthogonal outputs from an on-rotor MEMS accelerometer for reciprocating compressor condition monitoring [Text] / G. Feng, Niaoqing Hu, Z. Mones // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – g. – Vol. 76-77. – P. 228-241.



References

1. Diagnostika gornykh mashin i oborudovaniya [Tekst] / B.L. Gerike, P.B. Gerike, G.I. Kozovoy [i dr.] – M.: IPO «U Nikitskikh vorot», 2012. – 400 s.
2. Kostyukov V.N., Naumenko A.P. Osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki i monitoringa [Tekst] – Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2014. – 459 s.
3. Kelly, S. Graham. Advanced vibration analysis [Text]. 2013. – 637 p. – (Dekker mechanical engineering).
4. Krakovskiy, Yu. M. Matematicheskie i programmnye sredstva otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya [Tekst]. – Novosibirsk: Nauka, 2005. – 200 s.
5. Balitskiy, F. Ya. Diagnostika defektov mashinnogo oborudovaniya v nelineynoy vibrodiagnostike metodom kaskadnoy demodulyatsii vibratsii [Tekst] / F.Ya. Balitskiy, A.G. Sokolova, G.V. Dolaberidze, Ivanova M.A. // Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya. 2013. T. 12, № 76. S. 3-12.
6. Zhou, Jing. Fault detection of rolling bearing based on FFT and classification [Text] / Jing Zhou, Yong Qin, Linlin Kou // Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. – 2015. – Vol. 9, no. 5. – P. JAMDSM0056.
7. Shahapurkar, Saurabh S. Detection of Fault in Gearbox System Using Vibration Analysis Method [Text] / Saurabh S. Shahapurkar, Hemant S. Pansare, Prashant P. Dhebe // International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS). 2015. May. Vol. 2, no. 5. P. 119-122.
8. Lin, Hsiung-Cheng. Bearing vibration detection and analysis using enhanced fast Fourier transform algorithm [Text] / Hsiung-Cheng Lin, Yu-Chen Ye, Bo-Jyun Huang // Advances in Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 8, no. 10. – P. 1687814016675080.
9. Aslamov, Yu.P. Veyvlet-funktsiya dlya diagnostiki podshipnikov kacheniya [Tekst] / Yu.P. Aslamov, I.G. Davydov // Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki. 2018. № 11. – S. 15-23.
10. Satish, L. Short-time Fourier and wavelet transforms for fault detection in power transformers during impulse tests [Text] / L. Satish // IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology. – 1998. – March. – Vol. 145, no. 2. – P. 77-84.
11. Gerike B.L., Klishin V.I., Mokrushev A.A. Ob odnoy otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya opornykh uzlov gornykh mashin [Tekst] // FTPRPI, № 6. – 2019. – S. 106-114.
12. Kompella, K.C. Deekshit. DWT based bearing fault detection in induction motor using noise cancellation [Text] / K.C. Deekshit Kompella, Venu Gopala Rao Mannam, Srinivasa Rao Rayapudi // Journal of Electrical Systems and Information Technology. – 2016. – Vol. 3, no. 3. – P. 411 - 427.
13. Qin, Zengguang. Continuous wavelet transform for non-stationary vibration detection with phase-OTDR [Text] / Zengguang Qin, Liang Chen, Xiaoyi Bao // Opt. Express. – 2012. – Aug. – Vol. 20, no. 18. – P. 20459-20465.
14. Singru, Pravin. Bearing failure prediction using Wigner-Ville distribution, modified Poincare mapping and fast Fourier transform [Text] / Pravin Singru, Vishnuvardhan Krishnakumar, Dwarkesh Natarajan // Journal of Vibroengineering. – 2018. – July. – Vol. 20, no. 1. – P. 127-137.
15. Staszewski, W.J. Time-frequency analysis in gearbox fault detection using the Wigner-Ville distribution and pattern recognition [Text] / W.J. Staszewski, K. Worden, G.R. Tomlinson // Mechanical Systems and Signal Processing. — 1997.
16. Fedala, Semchedine. Contribution of Angular Measurements in the Diagnosis of Gear Faults by Artificial Neural Networks [Text] // Semchedine Fedala, Didier Remond, Rabah Zegadi // Surveillance 7 International Conference. – Chartres, France: Surveillance, 2013. – Oct. – P. 1-18.
17. Fedala, Semchedine. Contribution of angular measurements to intelligent gear faults diagnosis [Text] / Semchedine Fedala, Didier Remond, Rabah Zegadi // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2018. – Jun. – Vol. 29, no. 5. – P. 1115-1131.
18. Fei, Sheng-wei. Kurtosis prediction of bearing vibration signal based on wavelet packet transform and Cauchy kernel relevance vector regression algorithm [Text] / Sheng-wei Fei // Advances in Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 8, no. – P. 1-7.
19. Feldman, Michael. Hilbert transform in vibration analysis [Text] / Michael Feldman // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2011. – Vol. 25, no. 3. – P. 735-802.
20. Feng, G. An investigation of the orthogonal outputs from an on-rotor MEMS accelerometer for reciprocating compressor condition monitoring [Text] / G. Feng, Niaoqing Hu, Z. Mones // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – g. – Vol. 76-77. – P. 228-241.



Авторы

Герике Павел Борисович,

старший научный сотрудник
канд. техн. наук, доцент
e-mail: am_besten@mail.ru
Федеральный исследовательский центр угля и
углехимии, Институт угля
Российская Федерация, г. Кемерово, 650010,
пр. Ленинградский, 10

Герике Борис Людвигович,

главный научный сотрудник,
докт. техн. наук, профессор
e-mail: gbl_42@mail.ru
Федеральный исследовательский центр угля и
углехимии
Российская Федерация, г. Кемерово, 650010,
пр. Ленинградский, 10
Кузбасский государственный технический
университет имени Т.Ф. Горбачева
Российская Федерация, г. Кемерово, 650000,
ул. Весенняя, 28
Филиал Кузбасского государственного
технического университета в г. Прокопьевске
Российская Федерация, Кемеровская область –
Кузбасс, г. Прокопьевск, 653049, ул.
Ноградская, 19а

Пудов Евгений Юрьевич

директор
канд. техн. наук, доцент
e-mail: pudov_evgen@mail.ru
Филиал Кузбасского государственного
технического университета в г. Прокопьевске
Российская Федерация, Кемеровская область –
Кузбасс, г. Прокопьевск, 653049, ул.
Ноградская, 19а

Библиографическое описание статьи

Герике П.Б., Герике Б.Л., Пудов Е.Ю. Обзор
методов диагностики зубчатых передач // *Техника и технология горного дела.* – 2021. – №
1 (12). – С. 53-68.

Authors

Pavel B. Gerike

senior researcher
Ph.D. (Economics), Assistant Professor
e-mail: am_besten@mail.ru
Federal State Budget Scientific Centre «The Federal
Research Center of Coal and Coal-Chemistry of
Siberian Branch of the Russian Academy of
Sciences», Institute of Coal
10 Leningradsky Av., Kemerovo, Russia, 650003

Boris L. Gerike

chief researcher,
Dr.Sc., Professor,
Department of Mining Machines and Complexes
e-mail: gbl_42@mail.ru
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University
28 Vesennyaya str., Kemerovo, Russia, 650000
Chief researcher of the Coal Machinery Laboratory
Federal State Budget Scientific Centre «The Federal
Research Center of Coal and Coal-Chemistry of
Siberian Branch of the Russian Academy of
Sciences», Institute of Coal
10 Leningradsky Av., Kemerovo, Russia, 650003
Branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical
University in Prokopyevsk
Prokopyevsk, 19a Nogradskaya str., 653049,
Kemerovo region – Kuzbass, Russian Federation

Eugene Yu. Pudov

director
Ph.D., assistant professor
e-mail: pudov_evgen@mail.ru
Branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical
University in Prokopyevsk
Prokopyevsk, 19a Nogradskaya str., 653049,
Kemerovo region – Kuzbass, Russian Federation

Cite this article

Gerike P.B., Gerike B.L., Pudov E.Y. (2021) Review
of gear transmission diagnostics methods, *Journal of
mining and geotechnical engineering*, 1(12):53.